



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY**

ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S MIKROČÁSTICEMI A NANOČÁSTICEMI

**ELECTRIC PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS WITH MICROPARTICLES AND
NANOPARTICLES**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ DVOŘÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ HUDEC

BRNO 2015

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá sledováním a porovnáváním elektrických vlastností mikro a nanokompozitních materiálů na bázi epoxidových pryskyřic v závislosti na teplotě. Jsou sledovány teplotní závislosti ztrátového činitele, relativní permitivity a vnitřní rezistivity.

Klíčová slova: kompozit, nanočástice, mikročástice, epoxidové pryskyřice, oxid křemičitý

Abstract

This thesis study and compare electric properties of micro and nanocomposites based on epoxy resins depending on temperature. In this thesis are observed temperature dependences of the dissipation factor, relative permittivity and internal resistivity.

Key words: composite, nanoparticles, microparticles, epoxy resins, silicon dioxide

Bibliografická citace práce:

DVOŘÁK, T. *Elektrické vlastnosti kompozitních materiálů s mikročásticemi a nanočásticemi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2015. 33 s. Bakalářská práce. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Hudec.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma **Elektrické vlastnosti kompozitních materiálů s mikročásticemi a nanočásticemi** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 1. června 2015

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Hudcovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 1. června 2015

.....
podpis autor

Obsah

Úvod.....	8
1 Kompozitní materiály.....	9
1.1 Definice	9
1.2 Rozdělení kompozitů.....	9
1.3 Struktura kompozitů	10
1.3.1 Základní technologie výroby kompozitů.....	10
1.3.2 Příprava kompozitů	12
1.3.3 Matrice	12
1.3.4 Vinylesterové pryskyřice.....	13
1.3.5 Epoxidové pryskyřice.....	13
1.3.6 Fenolické pryskyřice	13
1.4 Plniva kompozitů.....	13
1.4.1 Skleněná vlákna.....	14
1.4.2 Uhlíková vlákna	14
1.4.3 Organická vlákna.....	14
2 Nanokompozitní materiály.....	15
2.1 Historie nanotechnologie	15
2.2 Definice nanotechnologie	16
2.3 Nanoplňiva.....	16
2.4 Polymerní nanokompozity.....	16
2.5 Elektrické vlastnosti nanokompozitů.....	16
2.5.1 Elektrická vodivost.....	17
2.5.2 Rezistivita.....	17
2.5.3 Dielektrické ztráty	17
2.5.4 Ztrátový činitel $tg\delta$	18
2.5.5 Relativní permitivita.....	18
2.5.6 Prostorový náboj	18
2.5.7 Elektrická pevnost	18
2.5.8 Odolnost proti částečným výbojům.....	19
2.5.9 Perkolační práh.....	19
3 Experimentální část.....	20
3.1 Výroba experimentálních vzorků	20
3.1.1 Forma na výrobu vzorků	20
3.1.2 Příprava vzorků	20
3.2 Měření elektrických vlastností vzorků	22
3.2.1 Měření vnitřní rezistivity.....	22

3.2.2	Měření ztrátového činitele a relativní permitivity	22
3.3	Výsledky měření a jejich vyhodnocení	23
Závěr.....		29
Použitá literatura		30
Seznam obrázků		31
Seznam tabulek		32
Seznam symbolů		33

Úvod

Důležitou součástí technologického odvětví v průmyslu se staly kompozitní materiály. Technologie výroby kompozitních materiálů se stále zdokonaluje a umožňuje tak výrobu materiálu přesně na míru zákazníka. Významným krokem v oblasti kompozitů bylo zavedení nanoplniv a tím pádem samotných nanokompozitních materiálů. Vhodnými kombinacemi plniva a matrice lze získat materiály se specifickými vlastnostmi.

S kompozitními materiály se lze v dnešní době setkat téměř ve všech odvětvích, ale o jejich velké rozšíření se zasloužil hlavně kosmický a vojenský průmysl. Kompozitní materiály jsou hojně používané z důvodu jejich velké variability.

Tato bakalářská práce navazuje na diplomové práce Ing. Hudce, Ing. Ovsíka a Ing. Libry, kteří obohacovali epoxidovou pryskyřici o nanočástice a poté zjišťovali jejich vliv na elektrické vlastnosti. Předmětem této bakalářské práce je obohacování epoxidové pryskyřice o mikročástice oxidu křemičitého při zachování stejného postupu výroby a procentního plnění jako ve zmíněných pracích, sledování elektrických vlastností vytvořených mikrokompozitů a poté jejich porovnání s již vytvořenými nanokompozity. První a druhá část jsou zaměřeny teoreticky, třetí část je experimentální.

1 Kompozitní materiály

1.1 Definice

Kompozity jsou složené materiály, které představují směsnou soustavu, tvořenou makroskopickými útvary dvou a více materiálových složek. Jako složený materiál lze označit soustavu, která vyhovuje následujícím kritériím:

- Musí být tvořena člověkem.
- Soustavu tvoří propojení dvou a více materiálů rozdílného chemického složení, kde je jasná hranice mezi geometrickými útvary jednotlivých složek.
- Tyto geometrické útvary jsou spojeny v celém nebo téměř celém objemu.
- Vlastnosti složené soustavy musí být odlišné od vlastností jednotlivých složek.

Do složených materiálů se neřadí přírodní materiály, jako je například dřevo, přestože mají charakter složené soustavy. Využitím složených materiálů místo jednoduchých se zpravidla očekává ovlivnění některé z následujících vlastností:

- dosažení lepších mechanických vlastností,
- dosažení vyšší tvarové stability,
- dosažení vhodnějších tepelných vlastností,
- omezení hořlavosti,
- zmenšení nasákavosti,
- zmenšení smrštění a zamezení vzniku dutin a prasklin.

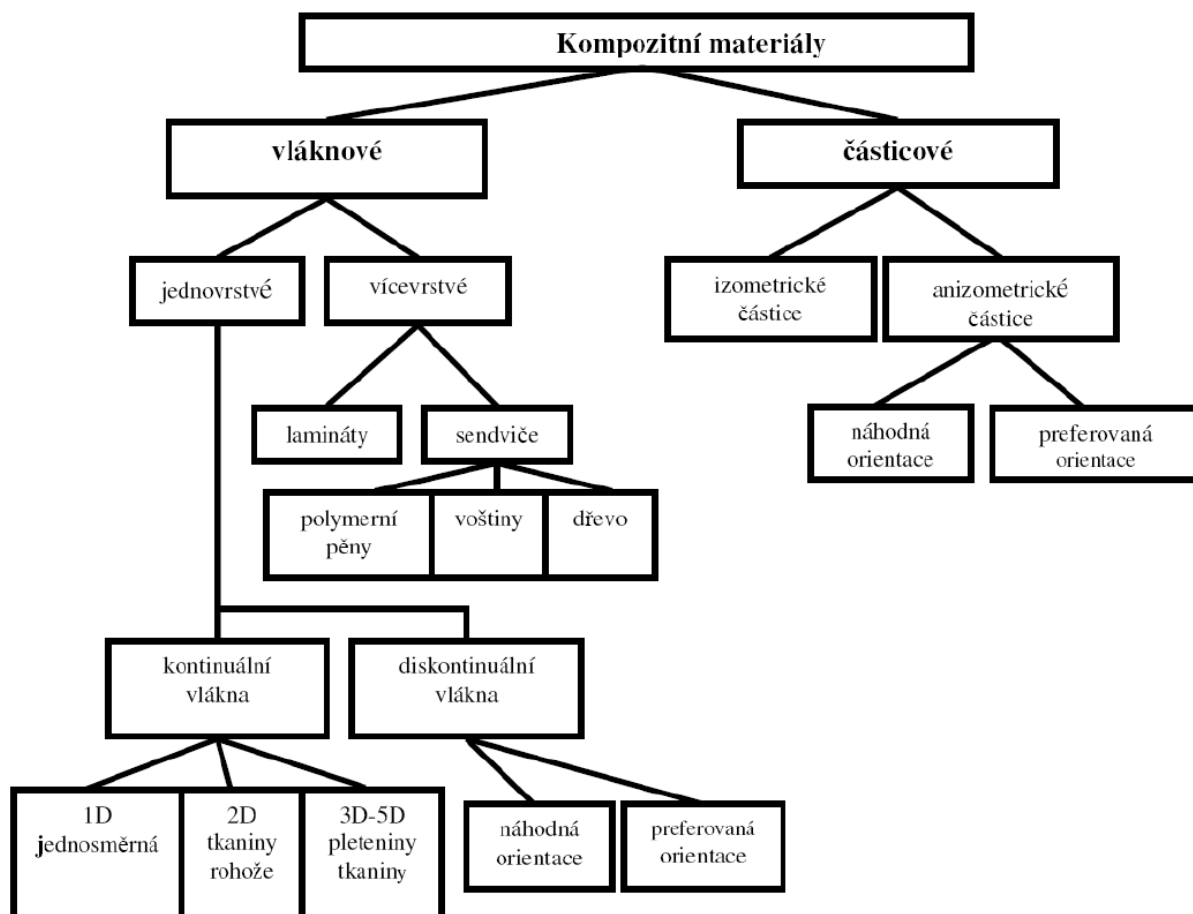
Vlastnosti materiálů složek udávají vlastnosti složených materiálů. Dále jsou výrazně ovlivňovány množstvím jednotlivých složek v soustavě, geometrickým tvarem částic složek, jejich orientací, uspořádáním a rozložením v soustavě. Na mechanické vlastnosti mají výrazný vliv chemické a fyzikální pochody probíhající na hranicích složek. K těmto dějům může docházet jak při výrobě složeného materiálu, tak při jeho používání [1].

1.2 Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů [2]. Jako mikrokompozity označujeme kompozitní materiály, které mají největší příčné rozměry výztuže mezi 10^0 až 10^2 μm . Dále se můžeme setkat s makrokompozity majícími velikost příčného rozměru od 10^0 do 10^2 mm. V neposlední řadě se setkáváme se skupinou nazývanou nanokompozity, které mají rozměr výztuže v nanometrech [3].

Podle geometrického tvaru výztuže můžeme kompozity dělit na:

- Částicové: jeden rozměr útvaru výztuže nepřesahuje výrazně rozměry ostatní. Vyztužující částice mohou mít tyto tvary: kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý i nepravidelný.
- Vláknové (s krátkými nebo dlouhými vlákny). Zde je výztuž v jednom směru výrazně rozměrnější. V kompozitu mohou být vlákna vedena stejným směrem nebo vzájemně propletena do rohoží (laminát) [3].



Obrázek 1 - Dělení kompozitů

1.3 Struktura kompozitů

V dnešní době můžeme kompozity najít v širokém spektru zpracování, které se od sebe odlišují pojivem (neboli matricí) a dále také způsoby výroby (laminace, tažení, navíjení atd.). Polymerní matrice se dají rozdělit podle mnoha fyzikálních kritérií. Nejčastěji je však dělíme na termoplasty a reaktoplasty (polymerní pryskyřice) [4].

1.3.1 Základní technologie výroby kompozitů

Výrobu kompozitů je možné rozdělit do dvou základních skupin, a to podle konstrukce formy, do které se nalévá směs základního materiálu a plniva, na:

- otevřenou (jednodílnou),
- uzavřenou.

Na typu formy závisí odpařování „ředidla“ z pryskyřice [8]. Níže jsou uvedeny některé způsoby výroby kompozitů.

Ruční kladení – bývá také nazýváno jako kontaktní lisování. Při tomto procesu je jak výztuž, tak pryskyřice nanášena ručně, a to na vhodný povrch formy. Jako hlavní přednosti tohoto způsobu mohou být jmenovány jednoduchost technologie a minimální náklady na potřebné nástroje. Hlavními nevýhodami tohoto způsobu výroby je odpad, který se dá jen těžko znovu zpracovat a nízká produktivita. Další nevýhodou je, že výsledná kvalita výrobku je závislá

na znalostech a zkušenostech pracovníka. V současnosti má tato metoda už více modifikací a různých zlepšení. Příklady z upravených metod jsou metoda vakuového vaku nebo metoda tlakového vaku, u které dojde k vytlačení přebytečných bublin při poslední fázi vytvrzování. Toto vytlačení bublin je také hlavní výhodou těchto metod, kdy má výsledný materiál minimální obsah vzduchových bublin.

Navíjení – tento způsob výroby je založen na navíjení svazku vláken či jinak upravených výztuží na kruhovou formu. Navíjena mohou být vlákna, která se provlhnou až po navíjení, nebo jsou navlhčena pryskyřicí už při navíjení. Uspořádání a orientace výztuží a vláken ovlivňuje výsledné vlastnosti materiálu. Výhody této metody jsou možnost automatické výroby a vysoká produktivita. Jako nevýhody lze zmínit odstraňování vnitřních forem, které probíhá až po vytvrzení a poměrně vysokou cenu navíjecích strojů.

Nanášení kompozitu do formy sprejem – tento způsob výroby probíhá tak, že se jako první nanese (nastříká) na povrch formy směs vláken a matrice ve formě spreje. Tato směs je následně vytlisována a poté vytvrzena. Výhody jsou nízké ceny strojů a jednoduchá výroba. Nevýhodou je obtížné dosažení přesně požadovaných vlastností materiálu, z čehož plynou zvýšené požadavky na pracovníky.

Metoda lisování se vstříkem matrice (RTM) – u této metody se setkáváme s uzavřenou formou, do které je vložena suchá výztuž, poté je forma uzavřena a je do ní vstříknuta pryskyřice. Výhody této technologie jsou možnost vytvrzování již při pokojové teplotě a přesné řízení tloušťky. Nevýhodou je fakt, že jde o formy, na které jsou kladeny vysoké požadavky, tyto formy jsou tedy drahé a těžké.

Metoda lisování ve formě - u tohoto způsobu výroby jsou do formy vloženy všechny komponenty zároveň (aditiva, pryskyřice, výztuže, mazadla, barviva, čínidla). Následně je forma uzavřena za pomoci zvýšeného tlaku a vytvrzena.

Lisování z prepregů (Prepreg = preimpregnovaná vyztužující tkanina – tato tkanina obsahuje přesně dané množství pryskyřice a výztuže, ve formě se nachází jako tenké vrstvy). Při vkládání do formy se setkáme se stejným postupem jako u ručního kladení. Výhodou je ovšem možnost přesného kladení výztuží. Naopak nevýhodou je vyšší cena prepregu oproti normální pryskyřici s výztuží.

Tažení - tato technologie využívá tažení vláken pryskyřičnou lázní. Výhodou je možnost vysokého stupně automatizace, to ovšem navyšuje náklady na výrobu.

Kontinuální laminace - tato metoda je jedna z nejstarších, která se rozvinula i v ČR. Princip metody je, že se na výrobní lince nanáší výztuž, pryskyřice i všechna aditiva a přísady předem určenou rychlostí. Po nanesení dochází k tvarování a vytvrzení směsi. Výhodami jsou možnost variability rozměrů, kvalitní povrch z obou stran a minimální odpad. Nevýhodami jsou složité zavádění výroby a vysoká cena zařízení potřebných k provozu.

Odstředivé lití – u této metody je využito odstředivé síly. Tato metoda tedy slouží hlavně pro výrobu oválných předmětů. Výhodami u této metody jsou nízké náklady na zařízení výroby, minimální odpad a možnost dosažení kvalitních a hladkých povrchů. Nevýhodou je vysoká cena zařízení, které slouží na výrobu forem [9].

Vytvrzování ve formě - u této metody se nejprve vytvoří směs všech komponent. Směs obsahuje epoxidovou pryskyřici, výztuž, aditivum, barvivo a čínidlo. Směs je následně

odvzdušněna, poté ohřata a nalita do formy. V samotné formě dochází k vytvrzování při zvýšené teplotě.

1.3.2 Příprava kompozitů

Nejdůležitějším krokem při výrobě kompozitů je smíchání polymeru s plnivem. Při začátcích výroby kompozitů byla plniva vmíchávána do polymeru v průběhu procesu polymerace. Později byly ovšem vyvinuty technologie, které umožnily rozptýlení plniv v polymerní matici v průběhu procesu zpracování. Tyto technologie jsou míchání v jednošnekových nebo vícešnekových strojích. Kompozitní materiály se mohou podle stupně rozemletí struktury dělit do tří skupin: fázově separované – konvenční kompozity, interkalované kompozity a rozvrstvené kompozity.

Fázově separované kompozity jsou strukturovány tak, že se v polymerní matici nacházejí rozptýlené částice montmorillonitu, které mají zachovanou strukturu. Pokud jde o interkalovaný kompozit, tak se molekuly dostávají mezi jednotlivé vrstvy montmorillonitu, což způsobí zvětšení jeho objemu, zůstává však stále pohromadě. V posledním jmenovaném, rozvrstveném kompozitu, jsou jednotlivé vrstvy v polymerní matici různě rozmístěny a úplně odděleny [10].

1.3.3 Matrice

Jako matici nazýváme spojitou složku, která chrání především křehká vlákna a zastává funkci pojiva výztuže. Při srovnání poddajnosti polymerních matic a vláken dojdeme k závěru, že jsou matrice výrazně poddajnější a pevnost v tahu u všech matic je menší než pevnost v tahu vláken (u polymerních matic až o dva řády) [6].

Nejpoužívanější matrice pro kompozity s kontinuálními vlákny jsou matrice polymerní, a to buď reaktoplastické nebo termoplastické [6].

Termoplasty – do této skupiny se řadí materiály jako je polyester (PS), polypropylen (PP), polyetylén (PE), polykarbonát (PC), polyetylén tereftalát (PET) a tak dále. Za pokojové teploty se nacházejí v pevném skupenství. Pokud jsou zahřáty nad teplotu, která je udána pro každý polymer jako teplota tání, tak dojde k změně skupenství a začnou být tekoucí [9]. Pokud se termoplast ochladí, zaujme opět svůj původní tvar.

Reaktoplasty – v této skupině se nachází epoxidy, nenasycené polyestery, melaminy a např. fenol formaldehydová pryskyřice. V předvytvrzovací fázi se reaktoplasty projevují jako viskózní, poměrně řidké tekutiny. Abychom dosáhli požadovaného tvaru reaktoplastu, používáme při chemické reakci katalyzátory a iniciátory, které zařídí jeho vytvrzení. Tento děj může být realizován při pokojové teploty, ale i za zvýšených teplot [4].

S ohledem na požadované vlastnosti výrobku se v průmyslu využívají jak termoplasty, tak reaktoplasty. Hlavními důvody proč se využívají reaktoplasty jsou jejich snadná dostupnost, relativně jednoduchý způsob výroby, nízká cena a lehká údržba. Vlastnosti termoplastů a reaktoplastů jsou odlišné. Výhody termoplastů jsou:

- levná výroba,
- strukturní stabilita je nedefinovatelná, skladování nevyžaduje klimatizaci,
- dobrá skladovatelnost z důvodu jejich lisování do malých plátů,
- trhliny na materiálu jsou snadno opravitelné,

- proces výroby je rychlý,
- dobrá mechanická odolnost a vysoká pevnost,
- jednoduchá kontrola kvality.

Aplikovatelnost termoplastů je však limitovaná, zde jsou hlavní nevýhody:

- na povrchu se materiál řasí, má špatnou přilnavost,
- materiál není stejnorodý,
- jejich obrábění je nákladné,
- při výrobě je vyžadována vyšší teplota a tlak,
- negativní dopad na životní prostředí,
- vyšší koeficient teplotní roztažnosti,
- používání je omezené z důvodu teplotní únavy materiálu.

1.3.4 Vinylesterové pryskyřice

Vinylesterové pryskyřice se používají na výrobu reaktoplastů, které mají skleněné a uhlíkové výztuže. Mohou být použity i pro náročnější aplikace. Jsou využívány z důvodu jejich velké chemické odolnosti a také velké mechanické odolnosti vůči namáhání. S ohledem na jejich uplatnění v průmyslu nejsou vyžadovány žádné speciální elektrické vlastnosti. Pokud je pro aplikaci nutná vysoká teplota, tak se nahrazují epoxidovou pryskyřicí [4].

1.3.5 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice se řadí do skupiny sloučenin s epoxidovou složkou (oxiranovou) v molekule. Tyto pryskyřice najdou využití zejména v lakových aplikacích, lepidlech, zalévacích a lisovacích hmotách a pojivech pro lamináty [4]. Z hlediska konstrukčního použití jsou nejvíce všestranné. Mají největší možnost modifikace vlastností vzhledem k jejich chemické struktuře, použitému tvrdivu a dalším možným modifikujícím přísadám.

1.3.6 Fenolické pryskyřice

Fenolické pryskyřice je možné označit jako reaktoplasty, které mají velkou tvrdost, malou houževnatost a vysoký modul pružnosti. Fenolické pryskyřice pochází z chemické reakce fenolu s formaldehydem. Jako první komerčně užívaná fenolická pryskyřice se na trhu objevil bakelit. U těchto pryskyřic je možnost výroby buď jako jednostupňová (resol) nebo dvoustupňová (novolak). Resol je výsledný produkt reakce formaldehydu a fenolu, kde je molární poměr formaldehydu a fenolu větší než 1. U této reakce je však ještě zapotřebí alkalický katalyzátor. Pokud jde o novolak, je molární poměr formaldehydu a fenolu menší než 1, a to je rozdíl mezi novolakem a resolem. Uplatnění fenolických pryskyřic může být například jako základ lepidel pro dřevovýrobu, pro výrobu brzdových destiček, pro automobilový průmysl atd. U kompozitních materiálů jsou fenolické pryskyřice používány do matic pro výrobu kompozitních profilů. Při aplikaci profilů matic fenolických pryskyřic je vyžadována výrazně snížená hořlavost.[4].

1.4 Plniva kompozitů

Při výrobě plniv kompozitu neboli výztuží se používá celá řada technologických postupů, jako jsou tažení, navíjení apod. Tato plniva mohou být ve formě vláken, tkanin nebo rohoží.

1.4.1 Skleněná vlákna

Nejčastěji používaným sklem při výrobě skleněných vláken je sklo typu E. Celkem existuje pět typů skel a to jsou S-sklo, C-sklo, E-sklo, D-sklo, L-sklo. Pro výrobu skla typu E, které je nejběžnější, je zapotřebí mnoho druhů oxidů, jako jsou SiO_2 , CaO , MgO , B_2O_3 , Al_2O_3 . Postup při výrobě je následující. Do posuvného pásu se vloží sklářský kmen a na konci posuvného pásu se za pomoci tažení vytvaruje skleněné vlákno. Toto vlákno se táhne z platinových vaniček a průměr vlákna se pohybuje v rozmezí od 3,5 do 20 μm . Vlákná, která vycházejí po procesu, jsou navíjena na buben. Vláknó je po vytažení velice lámavé a křehké, proto musí být nanesena tenká laková vrstva jako ochrana. Tato vrstva se nazývá apretační a vytváří lepší spojovací vazby mezi matricí (pryskyřice) a skleněným vláknem (plnivo).

1.4.2 Uhlíková vlákna

Z důvodu dobrých přirozených vlastností uhlíkových vláken, jako je například velká tepelná odolnost, vysoká pevnost nebo nízká měrná hmotnost, jsou uhlíková vlákna často využívána jako plniva kompozitů. Vlastnosti zmíněné výše ovlivňují výrazně pozitivně výsledný kompozitový výrobek. Uhlíková vlákna je možné rozdělit do dvou skupin, a to na HS („high strength“) a HM („high modulus“). První zmíněný typ vlákna HS se vyrábí za teploty 900 °C až 1500 °C, tato vlákna jsou velice pevná, a proto se můžeme setkat také s názvem vysokopevnostní. Druhý zmíněný typ vlákna HM je získáván při karbonizaci při teplotách 2000 °C až 2800 °C, tyto vlákna se vyznačují vysokým modulem tahu (karbonová vlákna) [5].

1.4.3 Organická vlákna

Dalším zástupcem plniv do kompozitů jsou organická vlákna. Nejvýznamnější organické vlákno se nazývá aramidové vlákno. Toto vlákno bylo vyvinuto z aromatizovaného polyamidu a v průmyslu jej známe pod názvem KEVLAR®. Jako základ slouží jednoduché polymerní vlákno polyetylenu. Tato vlákna jsou vyráběna za pomoci průtlačného lisování a rotačními procesy. Obliba aramidového vlákna je způsobena dobrými mechanickými vlastnostmi. Organických vláken, která jsou používána jako výztuže, existuje velmi mnoho. Většina organických vláken je tvořena z celulózy. Tato vlákna jsou tvarována polymerizací molekul glukózy [5].

2 Nanokompozitní materiály

2.1 Historie nanotechnologie

Jako úplné začátky nanotechnologií by se dalo považovat už přidávání prášků do skla, za účelem získání barevných efektů. Na základě dnešních výzkumů se ukázalo, že se v těchto prášcích nacházely i částice v rozměru nanometrů a že tyto částice způsobovaly samotnou barevnost skel. Mezi známé artefakty obsahující nanočástice patří například Lykurgovy poháry, které pocházejí již ze 4. století našeho letopočtu. Slitiny těchto pohárů obsahují nanočástice na bázi Au – Ag. Není ovšem známo, jak probíhala samotná výroba. První, kdo popsal suspenzi obsahující částice o rozměrech 1 – 100 nm, byl Thomas Graham v roce 1861 a dal jí název koloidní systém. Tyto systémy byly poté pozorně sledovány významnými vědci. To později vedlo k vzniku oboru koloidní chemie. Kdybychom chtěli nalézt i laikovi známý příklad nanomateriálu, můžeme zmínit například saze, které vznikají nedokonalým spalováním organických látek s vysokým obsahem uhlíku. Jsou to částice amorfního uhlíku mající velikost 10 – 500 nm.

Jako první průkopník nanotechnologií je uznáván Richard Philips Feynman. Ten v prosinci roku 1959 nastínil v přednášce s názvem „There’s Plenty of Room at the Bottom“ („Tam dole je spousta místa“) svou představu o budoucnosti nanotechnologií. Zabýval se praktickým využitím světa atomů v budoucnosti. Na přednášce byla také položena otázka: „Proč bychom nemohli zapsat na špendlíkovou hlavičku všech 24 dílů Encyklopedie Britanniky?“. V následující pasáži dokazuje, že nás v tom příroda nelimituje. Dále ukázal způsob, jak tento text na tak malou plochu zapsat. Postupně se od zápisu informací dostal Feynman k možnostem ovlivňování chemické reakce na atomární úrovni a k manipulaci s molekulami a atomy [7].

Na tyto myšlenky v 80. letech minulého století navázal Kim Eric Drexler v jeho knihách s názvy „Stroje stvoření: Nástup éry nanotechnologie“ (Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology) a „Nanosystémy“ (Nanosystems). V těchto publikacích byly popsány miniaturní umělé systémy, nanoroboti, jejichž velikost bude na molekulární úrovni. Nanoroboti se budou podobat živým organismům například schopností reprodukce, vzájemnou komunikací, nebo sebezdokonalováním. Dalším z průkopníků je Timothy Leary. Zabýval se nanotechnologiemi a také kryogenetikou. Leary tvrdil, že bude s rozvojem nanotechnologie možné vytvořit jakýkoliv předmět pouze z prachu a slunečního svitu. V době, kdy tito vědci vydávali své publikace, byli ovšem považováni spíše za bláznů. To se však změnilo v době prudkého rozvoje oblastí nových technologií a na konci dvacátého století se jejich teorie začali brát vážně. Významným milníkem v oboru nanotechnologií byl v 80. letech objev rastrovacího mikroskopu SMT (Scanning Tunneling Microscope) a mikroskopu atomárních sil AFM (Atomic Force Microscope). Tyto mikroskopy umožnily lidem nahlédnout do světa o rozměrech mikrometrů, nanometrů a ještě menších. V 90. letech minulého století přišel nástup internetu, dále také rozvoj mikrosystémového a geometrického inženýrství. Přišly také první úspěšné pokusy s technologiemi, které měly rozměry nanometrů. Firma IBM vytvořila v roce 1990 logo firmy na niklovou destičku 35 izolovanými xenonovými atomy a to za pomoci tunelového skenovacího mikroskopu. V dalším roce bylo představeno vedení elektrického proudu za pomoci jediné molekuly v uhlíkaté nanotrubičce. Později se v laboratořích firem a univerzit povedlo sestavit první nanomechanismy. Příkladem je osa 10 000 krát tenčí než lidský vlas a neviditelná molekulová ložiska s velice nízkým třením [1].

2.2 Definice nanotechnologie

Nanotechnologie obecně označuje vědní obor výzkumu a vývoje zabývající se cíleným vytvářením a využíváním struktur materiálů v měřítku několika nanometrů, obvykle o rozměrech 1 až 100 nm. Obor nanotechnologií již prošel mnohaletým vývojem a je neustále zdokonalován. Cíl technologie nanočástic je vznik objektu nebo struktury (s rozměry menšími než doposud dosaženými běžnou technologií) s novými vlastnostmi, za pomoci přesného ovládní jednotlivých atomů a molekul [5].

2.3 Nanoplňiva

Mezi nanoplňiva, která jsou používána nejčastěji, řadíme jíl a anorganické oxidy, například SiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , TiO_2 . Takzvané nanoprášky jsou nejčastěji používané částice. Nanoprášky jako TiO_2 a ZrO_2 je možné najít v opalovacích krémech, kosmetických krémech a pleťových vodách, prášky TiO_2 můžeme použít také na reflexní laky nebo pro optimální zatmavení skel. Jako UV filtr ve rtěnkách a líčidlech jsou používány nanočástice Fe_2O_3 . Pokud je povrch skla pokryt nanoplňivem SiO_2 , způsobují tyto nanočástice srážení vody na skle. Tato vlastnost skla je dobře využitelná například v automobilovém průmyslu, nebo u brýlí či zrcadel. Dalším využitím může být prodloužení životnosti nástrojů nanesením nanostrukturního povlaku na povrch nástroje, který pak chrání nástroj před oděry, opotřebením atd. Tyto vrstvy jsou nejčastěji tvořeny uhlíkem. Kontrola a diagnostika těchto nástrojů může probíhat na základě elektrického odporu, který se v závislosti na tlaku mění. Na leštění optických materiálů nebo elektronických substrátů lze použít nanočástice Si či GaAs. Nanočástice, které slouží pro přesné opracování povrchu, u kterého dojde k snížení vlnitosti na 1 až 2 nm, jsou karbid křemíku, diamant a karbid bóru. Tato výroba je velmi důležitá při miniaturizaci elektronických zařízení a optoelektronických systémů. Největší uplatnění nanomateriálů je ovšem v oblasti informačních technologií při výrobě křemíkových tranzistorů, které využívají řízené depozice vrstvených struktur pouze několika atomů, tenkých přibližně 1 nm. Se zmenšující se délkou hradla tranzistoru se zmenšuje také celý tranzistor, který je ve výsledku rychlejší a energeticky účinnější [5].

2.4 Polymerní nanokompozity

Polymerní nanokompozity mají výhodné fyzikální vlastnosti, spojují totiž elasticitu organické matrice s vlastnostmi většinou rigidní anorganické nanofáze. Pokud do polymerní matrice přidáme nanočástice, dojde u těchto materiálů k významným změnám mechanických, elektrických a dielektrických vlastností. Výsledky z dřívějších výzkumů ukazují, že oproti klasickým polymerům nebo tradičním kompozitům s mikročásticemi, nastává u příměsových polymerů zlepšení mechanických, tepelných i přechodných vlastností. To je důvod využití těchto nanokompozitů v mnoha odvětvích (automobilový průmysl, kosmický průmysl atd.). Polymerní kompozity zažívají v dnešní době nástup i v odvětví elektroizolačních materiálů pro výkonová zařízení. Jejich výzkum a studium má tedy velký význam z hlediska případných aplikací těchto materiálů v praxi [5].

2.5 Elektrické vlastnosti nanokompozitů

Na základě elektrické vodivosti je možné rozdělit látky do čtyř hlavních kategorií. Tyto kategorie jsou izolanty, vodiče, polovodiče a supravodiče. V odvětví kompozitních materiálů jsou důležité určité elektrické vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti se řadí například relativní permitivita, ztrátový činitel a elektrická pevnost. Zájem je ale ovšem o polymerní materiály, u kterých nanoplňiva způsobují zlepšení jejich elektrických vlastností [8].

2.5.1 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost je fyzikální veličina, pomocí které popisujeme vedení elektrického proudu materiálem. Pro dosažení vodivosti kompozitu musí kompozit obsahovat komponenty. Jako příklad takového materiálu můžeme uvést karbon – keramiku. Pokud je kompozit plněn nízkým procentem vodivých částic, pak nevykazuje elektrickou vodivost. Tuto nevodivost způsobuje vzájemná izolace částic, které poté netvoří vodivou síť, protože jsou od sebe příliš vzdáleny.

Podle typu nositelů elektrického náboje se elektrická vodivost dielektrik rozděluje na:

- iontovou,
- elektronovou a
- elektroforetickou.

U této vodivosti dochází k přenosu elektrického náboje za pomoci iontů. Tyto ionty se mohou vyskytovat buď ve formě nečistot v látce, nebo jako součást daného materiálu. Elektronová vodivost je definována jako vodivost, u které hlavní přenos elektrické náboje zaručují volné elektrony. Elektronů je však u většiny dielektrik příliš málo. Z toho důvodu můžeme tento druh vodivosti sledovat až při vysokých intenzitách elektrického pole. Jako elektroforetickou vodivost označujeme vodivost, kde jako hlavní nositelé elektrického náboje vystupují koloidní částice. Tento druh vodivosti však můžeme zaznamenat pouze u kapalných látek, což jsou jediné látky, které tyto částice obsahují.

Dále můžeme elektrickou vodivost rozdělit podle pohybu náboje, a to na vnitřní a povrchovou. První zmíněnou, tedy vnitřní vodivost, lze sledovat u látek různých skupenství, avšak povrchovou je možné pozorovat pouze u látek v pevném skupenství. Vnitřní elektrickou vodivost ovlivňuje složení příměsí a dále také intenzita působícího elektrického pole. Povrchová vodivost je ovlivněna především vlhkostí materiálu a také jeho schopností odpuzovat vodu. S těmito vlastnostmi velmi úzce souvisí hladkost povrchu [8].

2.5.2 Rezistivita

Tato fyzikální veličina charakterizuje elektrický odpor vodiče. U nanokompozitů je předmětem zkoumání povrchová a vnitřní rezistivita. Rezistivitu nanokompozitů je možné ovlivnit přidáním plniva do matrice. Dále rezistivitu ovlivňují rozměry, tvar a množství částic plniva. U polymerních kompozitů můžeme pozorovat pozitivní teplotní závislost (PTC) [8].

2.5.3 Dielektrické ztráty

Jako dielektrické ztráty označujeme celkovou energii, která je rozptýlena v dielektriku za časový interval při působení elektrického pole. Tyto ztráty můžeme pozorovat jak při působení střídavých polí, tak i při působení stejnosměrných polí. Největší část rozptýlené energie je vyzářena ve formě tepla. V dielektriku můžeme definovat tři druhy ztrát:

- vodivostní,
- polarizační a
- ionizační.

První zmíněné ztráty, tedy ztráty vodivostní, jsou pozorovatelné u všech druhů dielektrik. Tyto ztráty jsou způsobeny povrchovou a vnitřní rezistivitou. K polarizačním ztrátám dochází

v důsledku polarizačních dějů, které se odehrávají uvnitř dielektrika. Ionizační ztráty můžeme sledovat jen u plynných látek. K vyjádření dielektrických ztrát je možné využít těchto čtyř materiálových veličin:

- ztrátový úhel – δ
- ztrátový činitel – $\operatorname{tg}\delta$
- ztrátové číslo – $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg}\delta$
- měrné dielektrické ztráty – P_z

2.5.4 Ztrátový činitel $\operatorname{tg}\delta$

Ztrátový činitel charakterizuje izolant z hlediska jeho dielektrických ztrát. U nanokompozitů se pokles ztrátového činitele $\operatorname{tg}\delta$ projevil na nízkých frekvencích a vysokých teplotách, například u nanokompozitu ve složení epoxid – oxid titaničitý. Z měření je patrné, že ztrátový činitel $\operatorname{tg}\delta$ v oblastech vyšších frekvencí klesá, kdežto v oblastech nízkých frekvencí roste, což je odlišné od běžných materiálů. Dále bylo zjištěno, že použití nanočástic s vyšší relativní permitivitou, za předpokladu síťové nebo vyšší frekvence, může vést k vzniku kompozitů s nižší relativní permitivitou, než jakou měl základní polymer a nanočástice. Z praktického hlediska se jedná o důležité zjištění, protože mohou být použity pro snížení jalového proudu.

2.5.5 Relativní permitivita

Relativní permitivita je pro každý materiál charakteristická hodnota, která je větší než jedna. Relativní permitivita je závislá na teplotě, což ovlivňuje vlastnosti materiálu. Pokud plníme polymery anorganickými plnivy, které mají miniaturní rozměry v řádu několika desítek procent, pak relativní permitivita roste. Tento jev je způsoben tím, že relativní permitivita plniva je vyšší než relativní permitivita polymeru. Kompozity plněné nanočásticemi vykazují pokles relativní permitivity. Při správném rozptýlení nanostruktury má relativní permitivita tendenci klesat.

2.5.6 Prostorový náboj

Prostorový náboj je v podstatě elektrický náboj obsažený v určitém prostoru. Nanoplňniva mají tendenci tento prostorový náboj snižovat. Bylo zjištěno, že při plnění nanočásticemi se prostorový náboj až dvakrát sníží, oproti plnění mikročásticemi. Prostorový náboj byl zjištěn na nanokompozitech epoxidu – oxid titaničitý, oxid hlinitý nebo například EVA nanokompozitech.

2.5.7 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost definuje velikost intenzity elektrického pole, která je potřebná k průrazu dielektrika. Elektrická pevnost je ovlivněna chemickou čistotou materiálu, mechanickým namáháním, teplotou a klimatickým prostředím, ve kterém se daný materiál vyskytuje. S ohledem na různá měření lze konstatovat, že pokud je kompozit plněn mikročásticemi, dochází k zhoršování elektrické pevnosti. Naopak u kompozitu plněného nanočásticemi se u nanokompozitu typu epoxid – oxid titaničitý neprojevovaly náznaky zhoršení elektrické pevnosti, dokud nebylo dosaženo desetiprocentního hmotnostního naplnění nanoplňniva. Nanoplňniva lze tedy na základě výsledků považovat za kladně působící činitele s ohledem na elektrickou pevnost, čímž prodlužují dobu do průrazu.

2.5.8 Odolnost proti částečným výbojům

Částečné výboje jsou elektrické výboje, které přemost'ují izolaci mezi elektrodami s různými potenciály pouze částečně. U nanokompozitu polyamid – vrstevnatý křemičitan a pro silikonové elastomerové nanokompozity byla zjištěna značně navýšená odolnost vůči těmto výbojům. Odpovědnost za tuto odolnost mají faktory, mezi které řadíme například vzájemnou pojivovou sílu mezi plnivem a matricí, prostor mezi plnivem nebo objem matrice [9].

2.5.9 Perkolační práh

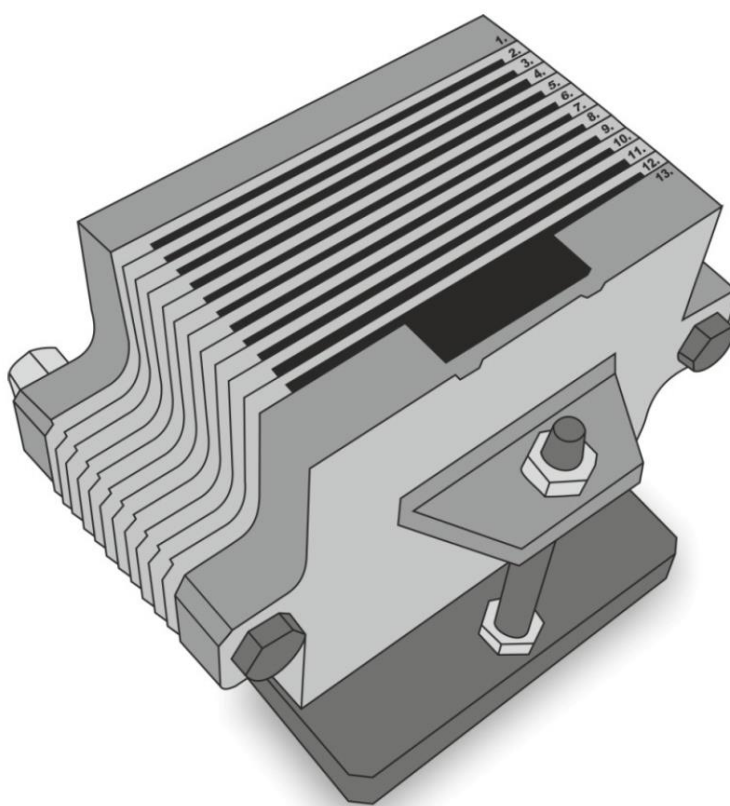
Perkolační práh je zcela zásadní faktor z hlediska vodivosti nanokompozitů. Tento práh určuje kritický obsah plniva, za kterého se začne materiál chovat jako vodič. Při dosažení perkolačního prahu se tedy v materiálu vytvoří řetězec, kde jsou částice plniva v přímém kontaktu. Pokud zvyšujeme obsah plniva v kompozitu, tak při obsahu, kdy se začnou částice plniva dotýkat a vytvářet tak makroskopickou síť vodivých řetězců, se bude vodivost postupně blížit vodivosti plniva.

3 Experimentální část

3.1 Výroba experimentálních vzorků

3.1.1 Forma na výrobu vzorků

Při výrobě experimentálních vzorků byla použita rozložitelná ocelová forma, která byla zapůjčena od firmy ABB Brno a která je zobrazena na obrázku 2 [4]. Skládá se z 13 kusů ocelových plátů poskládaných vedle sebe, které mají rozestupy 2 mm. Vzniklé mezery se vyplňují nalévanou směsí epoxidu a mikročastic. Díky spojitému dnu směs zatéká do všech částí rovnoměrně. Forma je spojena pomocí 4 šroubů. Dva vodorovné slouží k držení plátů pohromadě a při dostatečném dotažení zajišťují těsnící vlastnosti formy. Svislé šrouby slouží pro přichycení plátů na podložku (dno).



Obrázek 2 - Forma pro výrobu experimentálních vzorků

Před použitím je formu nutné důkladně odmastit, očistit a vysušit. Dále je nutné aplikovat na formu silikonovou vazelinu, která funguje jako separátor. Vrstva musí dosahovat takové síly, aby nedošlo ke kontaktu vzorku s formou, a přitom nesmí být tak silná, aby vazelína při ohřevu tekla a tím způsobovala nerovnosti povrchu na vzorku.

3.1.2 Příprava vzorků

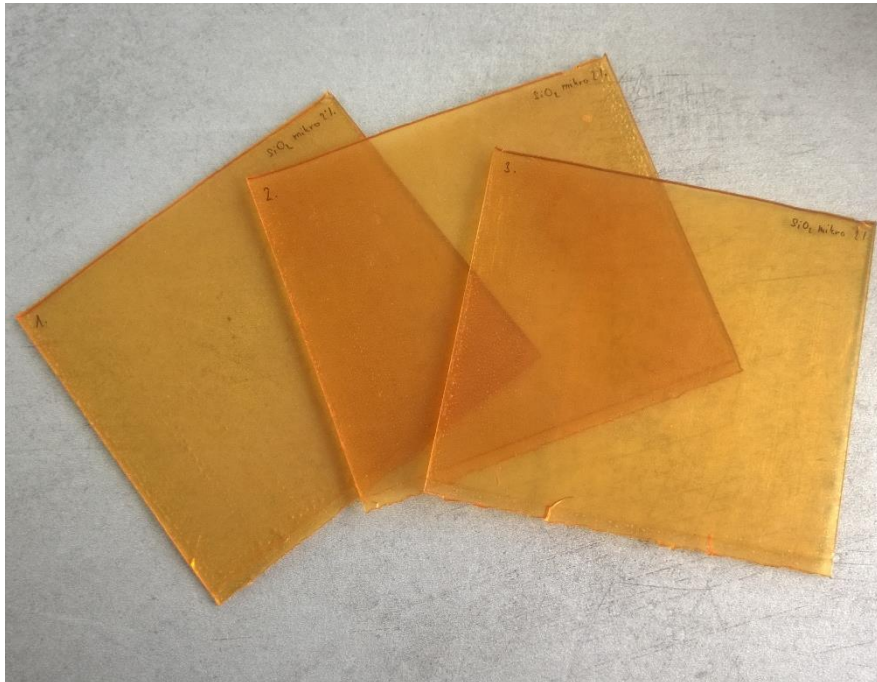
Základem směsi je epoxidová pryskyřice, změkčovadlo, tvrdidlo a urychlovač. Jedna série obsahuje 450 gramů směsi, ve které jsou naváženy jednotlivé dílčí složky v přesně daném poměru. Jednotlivé složky směsi jsou předehřáty na teplotu 65 °C z důvodu dostatečně nízké

viskozity a následně jsou jednotlivé složky míchány po dobu 30 až 45 minut, aby bylo zajištěno jejich důkladné promíchání.

Po ohřátí se směs přesune do komory Tettex, kde dochází za sníženého tlaku k jejímu odvzdušnění. Vzduch je z komory, která je vakuově uzavřena, vyčerpáván vývěvou. Pokud dojde při vakuování k přílišnému ochlazení (takovému, že se vzduchové bubliny špatně dostávají na povrch), je opakován proces ohřátí a poté znovu následuje odvzdušňování. Případné vzduchové bubliny uvnitř vzorku by mohly ovlivňovat výsledky naměřených hodnot. Po vakuování je směs znovu ohřáta a nalita do formy předehřáté na stejnou teplotu (65 °C). Z důvodu eliminace vzduchových bublin je opakován proces vakuování.

Proces vytvrzování vzorku probíhá ve dvou fázích. V první fázi dojde k vytvrzení epoxidu při teplotě 95 až 105 °C po dobu 2 až 3 hodin. Po první fázi vytvrzování se musí forma rozložit a jednotlivé vzorky vyjmout. Ve druhé fázi se vzorky epoxidu vytvrzují samostatně bez formy ve vodorovné poloze při teplotě 150 °C po dobu 10 až 12 hodin. Po vytvrzení se vzorky vyjmou ze sterilizátoru a odmastí se od silikonové vazelíny. Očištěné vzorky se opticky zkontrolují, označí a uskladní v exsikátoru s vysušeným molekulovým sítem (aby nedošlo k navlhnutí), kde jsou připraveny pro měření.

Při výrobě vzorků s nanočásticemi fungoval popsáný postup bez problémů. Výroba vzorků s mikročásticemi byla však komplikovaná i přes dodržení stejného postupu a použití stejných složek směsi. Již při první fázi vytvrzování docházelo k připékání vzorků k formě, přestože byla forma vymazána vrstvou vazelíny. Bylo vyzkoušeno několik druhů vazelín a různé tloušťky vymazání, ale i přesto se problémy opakovaly. Příčinou budou s největší pravděpodobností mikročástice.

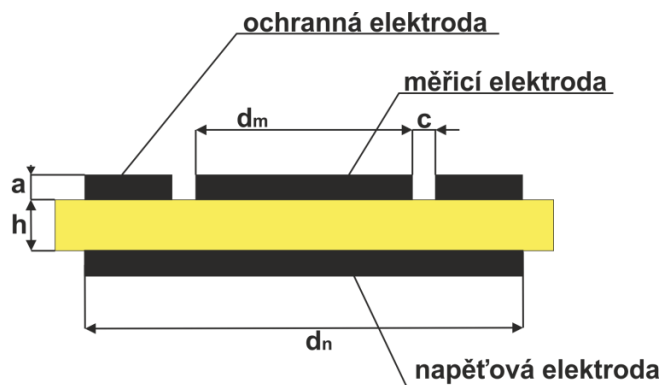


Obrázek 3 – Vzorky

3.2 Měření elektrických vlastností vzorků

3.2.1 Měření vnitřní rezistivity

Pro měření vnitřní rezistivity bylo využito tříelektrodového systému jako na obrázku 4 [8].



Obrázek 4 - Tříelektrodový systém

Průměr měřicí elektrody d_m se běžně volí v předem stanovené řadě: 10, 25, 50 a 100 mm. Pro výpočet vnitřní rezistivity ρ_v , bylo využito vztahu 3.1 pro efektivní plochu měřicí elektrody S_{ef} .

$$S_{ef} = \frac{\pi \cdot (d+c)^2}{4}. \quad (3.1)$$

Měření probíhalo na tříelektrodovém systému Tettex s průměrem měřicí elektrody $d = 49,5$ mm a šířkou vzduchové mezery $c = 1$ mm. Pro výpočet vnitřní rezistivity potom platí

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S_{ef}}{h}, \quad (3.2)$$

kde h je tloušťka vzorku. Hodnota elektrického odporu R_v se odečítá podle normy po jedné minutě. Měření bylo realizováno na analogovém megaohmmetru IM6, který byl propojen s tříelektrodovým systémem [4].

3.2.2 Měření ztrátového činitele a relativní permitivity

Pro měření relativní permitivity ϵ_r a ztrátového činitele $\tan \delta$ byl použit čtyřkapacitní most Tettex AG 2821/ZB. Pro výpočet relativní permitivity je nutné znát hodnotu kapacity C_4 odečtenou z čtyřkapacitního mostu po jeho vyrovnaní. Kapacita C_x se přepočítá podle vztahu 3.3:

$$C_x[pF] = \frac{100}{C_4[uF]}, \quad (3.3)$$

Výsledná relativní permitivita je potom dána podílem hodnot C_x a C_0 :

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} = \frac{C_x}{\epsilon_0 \cdot \frac{S_{ef}}{h}}, \quad (3.4)$$

kde ϵ_0 je permitivita vakua.

3.3 Výsledky měření a jejich vyhodnocení

V rámci experimentální části bakalářské práce byly změřeny hodnoty vnitřní rezistivity, ztrátového činitele a relativní permitivity u vzorků s obsahem mikročástic SiO_2 , s procentním plněním 0,5 %, 1 % a 2 %. Vzorky byly proměřovány v teplotní závislosti od 25 °C po 100 °C. Hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách níže.

Tabulka 1 - Hodnoty vzorků s 0,5% plněním

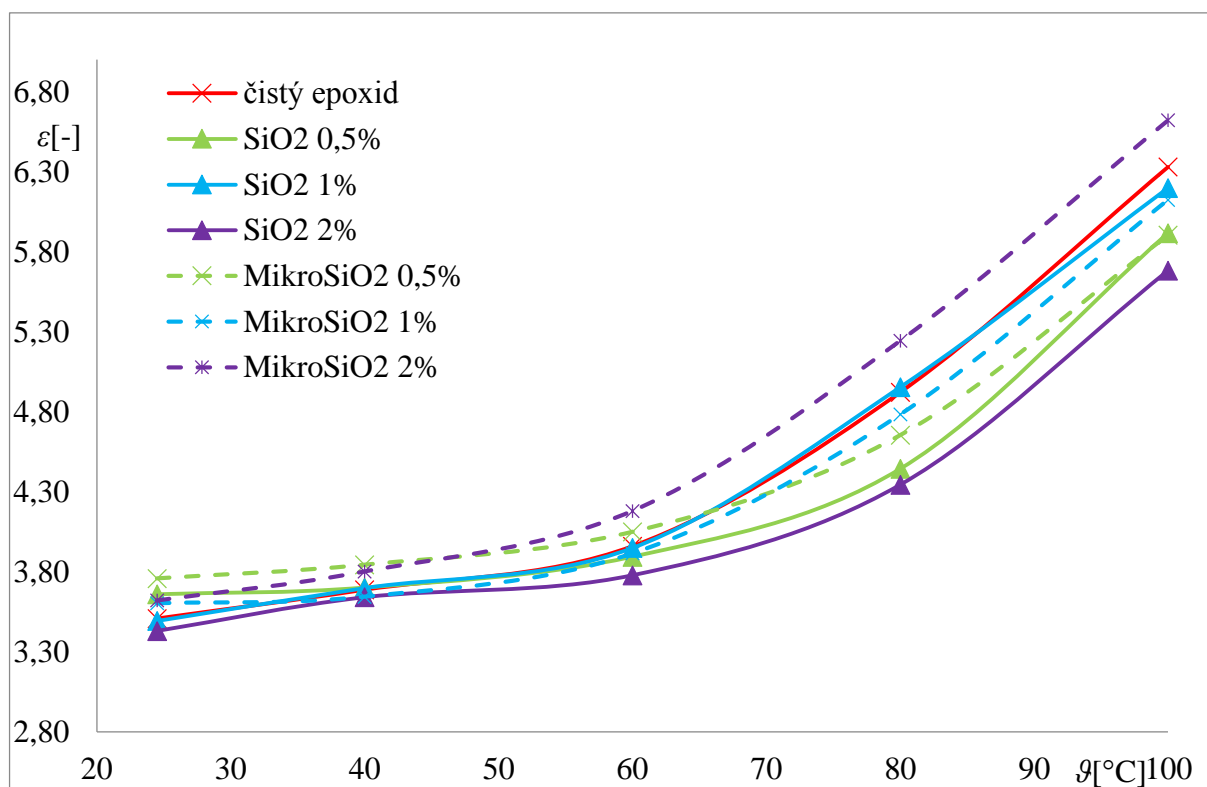
1. měření						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
30	3,03E+00	0,00465	8,00E+13	3,72	3,30E+01	4,01E+13
40	2,95E+00	0,0065	4,00E+13	3,82	3,39E+01	2,00E+13
60	2,78E+00	0,01575	9,50E+12	4,06	3,60E+01	4,76E+12
80	2,42E+00	0,0493	5,50E+11	4,67	4,14E+01	2,75E+11
100	1,90E+00	0,07575	6,00E+09	5,95	5,27E+01	3,00E+09
2. měření						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
30	2,97E+00	0,0034	1,30E+14	3,80	3,37E+01	6,51E+13
40	2,85E+00	0,00585	7,50E+13	3,95	3,50E+01	3,76E+13
60	2,74E+00	0,0131	2,00E+13	4,11	3,65E+01	1,00E+13
80	2,36E+00	0,04865	8,50E+11	4,79	4,24E+01	4,26E+11
100	1,89E+00	0,0661	1,70E+10	5,98	5,30E+01	8,51E+09
3. měření						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
30	3,01E+00	0,00475	5,50E+13	3,75	3,32E+01	2,75E+13
40	3,00E+00	0,00615	4,40E+13	3,76	3,33E+01	2,20E+13
60	2,83E+00	0,01725	1,10E+13	3,98	3,53E+01	5,51E+12
80	2,50E+00	0,0477	6,00E+11	4,51	4,00E+01	3,00E+11
100	1,95E+00	0,0707	1,00E+10	5,78	5,13E+01	5,01E+09
průměrné hodnoty (do grafu)						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
24,5		0,004267		3,76		4,42E+13
40		0,006167		3,84		2,65E+13
60		0,015367		4,05		6,76E+12
80		0,04855		4,65		3,34E+11
100		0,07085		5,90		5,51E+09

Tabulka 2 - Hodnoty vzorků s 1% plněním

1. měření						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
30	3,07E+00	0,00505	1,20E+14	3,67	3,25E+01	6,01E+13
40	3,02E+00	0,00755	5,50E+13	3,73	3,31E+01	2,75E+13
60	2,80E+00	0,024	3,00E+12	4,02	3,57E+01	1,50E+12
80	2,33E+00	0,0721	5,50E+10	4,83	4,28E+01	2,75E+10
100	1,77E+00	0,1283	1,20E+09	6,38	5,66E+01	6,01E+08
2. měření						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
30	3,31E+00	0,004	1,80E+14	3,40	3,02E+01	9,01E+13
40	3,29E+00	0,00625	7,50E+13	3,42	3,04E+01	3,76E+13
60	3,09E+00	0,0212	5,00E+12	3,66	3,24E+01	2,50E+12
80	2,50E+00	0,074	8,00E+10	4,51	4,00E+01	4,01E+10
100	1,99E+00	0,1085	1,50E+09	5,66	5,02E+01	7,51E+08
3. měření						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
30	3,02E+00	0,0051	1,30E+14	3,74	3,31E+01	6,51E+13
40	2,99E+00	0,00745	5,50E+13	3,78	3,35E+01	2,75E+13
60	2,77E+00	0,02405	4,20E+12	4,07	3,60E+01	2,10E+12
80	2,25E+00	0,077	4,00E+10	5,01	4,44E+01	2,00E+10
100	1,78E+00	0,1302	1,30E+09	6,34	5,62E+01	6,51E+08
průměrné hodnoty (do grafu)						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
24,5		0,004717		3,60		7,18E+13
40		0,007083		3,64		3,09E+13
60		0,023083		3,91		2,04E+12
80		0,074367		4,78		2,92E+10
100		0,122333		6,12		6,68E+08

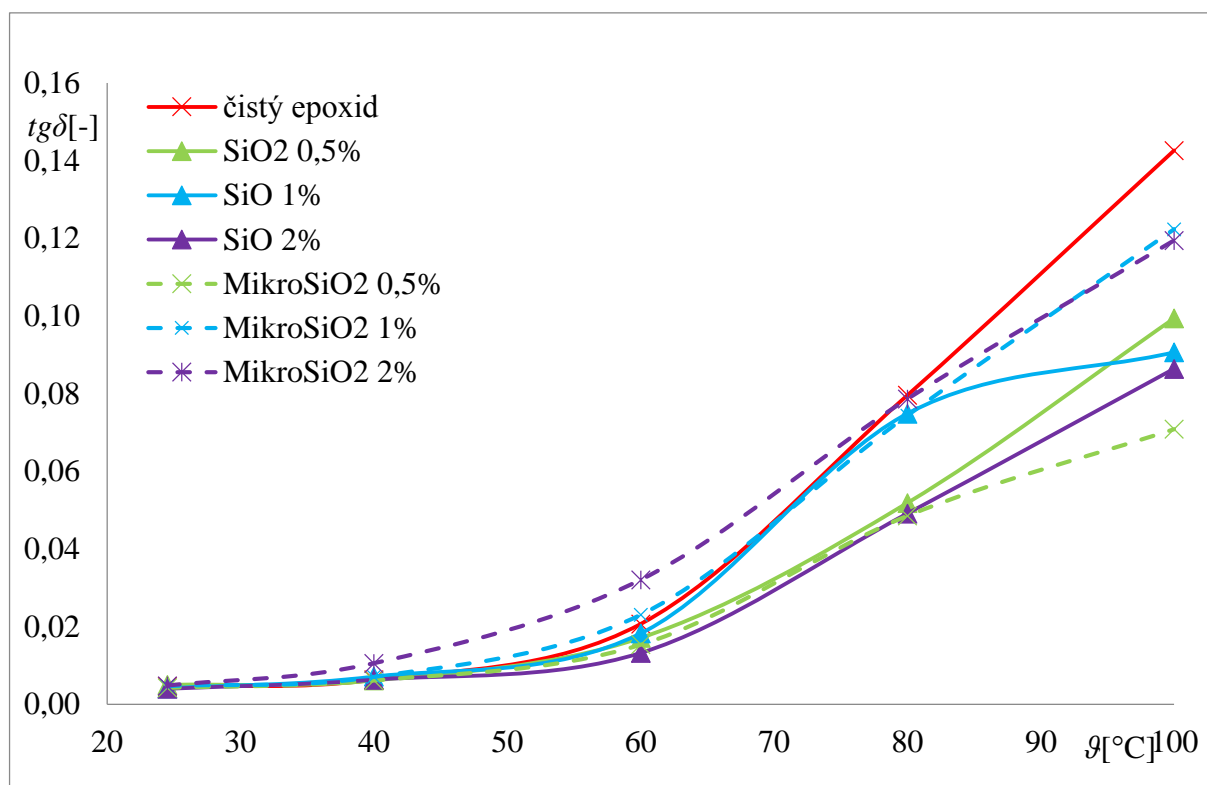
Tabulka 3 - Hodnoty vzorků s 2% plněním

1. měření						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
24,5	3,14E+00	0,0046	1,80E+14	3,59	3,18E+01	9,01E+13
40	3,00E+00	0,0092	4,60E+13	3,76	3,33E+01	2,30E+13
60	2,71E+00	0,03255	4,60E+12	4,16	3,69E+01	2,30E+12
80	2,15E+00	0,0815	2,90E+10	5,24	4,64E+01	1,45E+10
100	1,71E+00	0,1157	8,50E+08	6,59	5,85E+01	4,26E+08
2. měření						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
24,5	3,09E+00	0,0048	1,20E+14	3,65	3,23E+01	6,01E+13
40	2,93E+00	0,0115	3,60E+13	3,85	3,41E+01	1,80E+13
60	2,65E+00	0,0346	2,00E+12	4,25	3,77E+01	1,00E+12
80	2,15E+00	0,0788	2,00E+10	5,24	4,64E+01	1,00E+10
100	1,70E+00	0,1316	6,00E+08	6,65	5,90E+01	3,00E+08
3. měření						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
24,5	3,11E+00	0,005	1,40E+14	3,63	3,22E+01	7,01E+13
40	2,97E+00	0,011	3,80E+13	3,80	3,37E+01	1,90E+13
60	2,73E+00	0,029	5,50E+12	4,13	3,66E+01	2,75E+12
80	2,15E+00	0,0755	2,60E+10	5,26	4,66E+01	1,30E+10
100	1,70E+00	0,111	1,00E+09	6,62	5,87E+01	5,01E+08
průměrné hodnoty (do grafu)						
ϑ [°C]	C_4 [μF]	$\text{tg}\delta$ [-]	R_v [Ω]	ϵ_r [-]	C_x [pF]	ρ_v [Ωm]
24,5		0,0048		3,62		7,34E+13
40		0,010567		3,80		2,00E+13
60		0,03205		4,18		2,02E+12
80		0,0786		5,24		1,25E+10
100		0,119433		6,62		4,09E+08



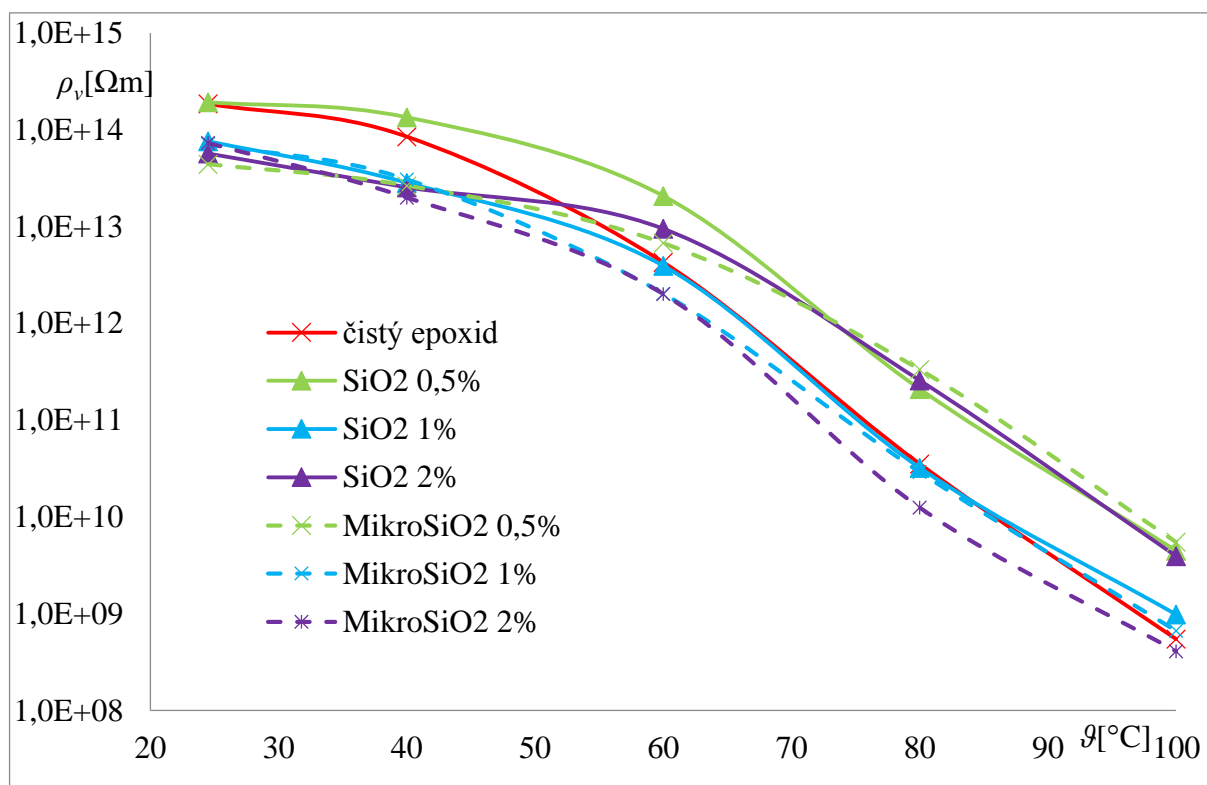
Graf 1- Graf teplotní závislosti relativní permitivity SiO₂

Z grafu teplotní závislosti relativní permitivity (graf 1) je vidět, že do teploty 60 °C se vliv mikročástic téměř neprojevuje. Jejich vliv začíná být patrný až od teploty 60 °C, a to pro vzorky s 0,5 a 2% plněním. Relativní permitivita vzorku s 1% plněním mikročásticemi je téměř shodná s hodnotou relativní permitivity u vzorku obsahujícího 1 % nanočástic, což zároveň odpovídá relativní permitivitě čistého epoxidu. Vzhledem k tomu můžeme konstatovat, že přidání mikro a nanočástic do epoxidové pryskyřice v objemu 1 % hmotnosti, nemá vliv. Pokud bereme v potaz pouze vzorky s mikročásticemi, tak u vzorků s 0,5% plněním byla zjištěna nejnižší relativní permitivita a zároveň mají pouze o málo vyšší relativní permitivitu než stejný vzorek s nanočásticemi. U vzorku s 2 % mikročástic se projevil opačný extrém vzhledem k vzorku s 2% plněním nanočásticemi a byla u něj zjištěna nejvyšší relativní permitivita.



Graf 2 - Graf teplotní závislosti ztrátového činitele SiO₂

V grafu teplotní závislosti ztrátového činitele (graf 2) je vidět, že vliv mikročástic se opět projevil až od teploty 60 °C, tentokrát ovšem pouze u vzorku s 0,5% plněním. Průběh závislosti vzorku s 1% plněním mikročásticemi odpovídal průběhu čistého epoxidu. U 2% plnění mikročásticemi se hodnoty do 80 °C držely nad hodnotami čistého epoxidu, avšak při teplotě 80 °C se hodnota ztrátového činitele shodovala s čistým epoxidem a na 100 °C již byla nižší než u čistého epoxidu. U 0,5% plnění mikročásticemi se hodnoty držely od 60 °C pod hodnotami čistého epoxidu a na 100 °C dokonce dosáhly nižší hodnoty ztrátového činitele než 2% plnění nanočásticemi. Ze vzorků plněných mikročásticemi dosáhl nejlepších výsledků vzorek s 0,5% plněním. Nejhorších výsledků dosáhlo opět 2% plnění.



Graf 3 - Graf teplotní závislosti vnitřní rezistivity SiO₂

Při experimentech s nanočásticemi bylo dosaženo nejlepších výsledků u vzorků s 2% plněním od teploty 60 °C, čemuž stejně jako u dvou předešlých závislostí odpovídají hodnoty vzorků s 0,5% plněním mikročásticemi. Vnitřní rezistivita vzorku s 1% plněním mikročásticemi je téměř shodná s hodnotou vnitřní rezistivity u vzorku obsahujícího 1 % nanočástic a od teploty 60 °C to zároveň odpovídá vnitřní rezistivitě čistého epoxidu. Vnitřní rezistivita vzorku s 2% plněním mikročásticemi je v celém teplotním spektru nejnižší ze všech zkoumaných. Můžeme konstatovat, že vliv mikro a nanočástic při 1% plnění se neprojevuje a při 2% plnění mikročásticemi dochází ke zhoršení ztrátového činitele výsledného kompozitu v porovnání s čistým epoxidem.

Závěr

Předmětem této bakalářské práce je seznámení se s mikro a nanokompozitními materiály na bázi epoxidových pryskyřic, vytvoření vzorků s různým procentním plněním mikročásticemi oxidu křemičitého a jejich porovnání s nanokompozity. V úvodu je provedeno souhrnné seznámení s kompozity, jejich typy a vlastnostmi. Následuje přehled nanokompozitů, jejich rozdělení a popis elektrických vlastností.

V rámci experimentu byly proměřeny hodnoty vnitřní rezistivity, ztrátového činitele a relativní permitivity u mikrokompozitů. Následně byly naměřené hodnoty vyneseny do grafů, ve kterých jsou vzájemně porovnány jednotlivé vlastnosti mikrokompozitů a nanokompozitů. Při výrobě vzorků s mikročásticemi pro praktickou část se vyskytly problémy s připékáním vzorků ve formě. Při výrobě vzorků s nanočásticemi se tento problém nevyskytl. Způsob výroby vzorků nebyl pozměněn, problém tedy nejspíše způsobily právě mikročástice.

U relativní permitivity se do 60 °C vliv mikročástic neprojevoval. Od teploty 60 °C se vliv mikročástic projevil u vzorků s 0,5 a 2% plněním. Vzorek s 1% plněním nejevil rozdíl vůči čistému epoxidu. Celkově nejnižších hodnot relativní permitivity dosáhl vzorek s 0,5% plněním mikročásticemi. Nejvyšších hodnot naopak vzorek s 2% plněním mikročásticemi. S ohledem pouze na nanočástice dosáhl nejnižších hodnot vzorek s 2% plněním a nejvyšších vzorek s plněním 1%.

Z grafu závislosti ztrátového činitele lze vidět, že vliv mikročástic se do 60 °C opět neprojevil a po dosažení této teploty došlo k snížení ztrátového činitele pouze u 0,5% plnění. Dále můžeme vidět, že 1% plnění kopíruje průběh čistého epoxidu a 2% plnění má ztrátový činitel do 60 °C vyšší než čistý epoxid. Pokud bereme v potaz pouze vzorky s nanočásticemi, dosáhl nejnižších hodnot vzorek s 2% plněním a nejvyšších vzorek s 1% plněním.

V případě vnitřní rezistivity byl vliv mikročástic patrný již od začátku. Vzorky s 2% a 1% plněním mikročásticemi vykazovaly velmi podobný průběh hodnot, které byly do teploty 80 °C nižší než hodnoty čistého epoxidu. U vzorku s 2% plněním mikročásticemi byla hodnota vnitřní rezistivity nejvyšší. Naopak nejvyšší hodnoty rezistivity, pokud bereme v potaz pouze vzorky plněné mikročásticemi, dosáhl vzorek s 0,5% plněním mikročásticemi. U nanočástic poskytl nejvyšší hodnotu vzorek s 0,5% plněním a nejnižší hodnoty vzorek s 1% plněním.

Z grafů je patrné, že při navyšování procentního plnění mikročásticemi oxidu křemičitého nevykazují kompozity stejný trend jako při přidávání nanočástic. U kompozitů, které obsahovaly nanočástice, docházelo s navýšením procentního plnění k zlepšení elektrických vlastností a nejlepších výsledků dosáhlo celkově 2% plnění. To, že se u nanokompozitů nezlepšovaly výsledky s každým navýšením procentního plnění, způsobil nejpravděpodobněji perkolační práh. U kompozitů s mikročásticemi byly nejlepší výsledky u vzorků s 0,5% plněním a s navyšováním procentního plnění docházelo k zhoršování sledovaných elektrických vlastností. Elektrické vlastnosti mikrokompozitů s 0,5% plněním byly srovnatelné s 2% plněním nanokompozitů. Vzhledem k použití ve výrobě se ovšem ukazuje 0,5% plnění mikročásticemi jako mnohem výhodnější, a to jak z důvodu menšího potřebného množství mikročástic (čtyřikrát méně než u nanočástic), tak i z důvodu výrazně nižší ceny mikročástic.

Použitá literatura

- [1] NOVÁK, P., *Vlastnosti lakových kompozitních materiálů plněných mikro- a nanočásticemi*. VUT Brno 2011, 79 stran
- [2] *Kompozitní materiály*. [cit. 2014-11-11]. Dostupné na WWW: http://umi.fs.cvut.cz/files/6_kompozitni-materialy.pdf
- [3] *Co je to kompozit?* [cit. 2014-11-15]. Dostupné na WWW: <http://fyzmatik.pise.cz/1342-co-je-to-kompozit.html>
- [4] OVSÍK, J., *Studium elektrických vlastností nanokompozitu*. VUT Brno 2010, 50 stran
- [5] HUDEC, J., *Sledování vlastností nanokompozitních materiálů*. VUT Brno 2013, 48 stran
- [6] *Historie a použití kompozitních materiálů*. [cit. 2014-12-17]. Dostupné na WWW: <http://mujweb.cz/zkoriek/historie.pdf>
- [7] *Historie moderních technologií*. [cit. 2014-12-1]. Dostupné na WWW: http://nanotechnologie.vsb.cz/Historie/nano_historie.pdf
- [8] LIBRA, M., *Sledování vlastností nanokompozitů na bázi epoxidových pryskyřic*. VUT Brno 2011, 40 stran
- [9] JANČÁR, J., *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. VUT Brno 2003, 194 stran
- [10] KREJČÍ, O., *PE/EVA Nanokompozity : Příprava, vlastnosti, použití*. UTB Zlín 2006, 34 stran

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Dělení kompozitů	10
Obrázek 2 - Forma pro výrobu experimentálních vzorků	20
Obrázek 3 - Vzorky	21
Obrázek 4 - Tříelektrodový systém	22

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Hodnoty vzorků s 0,5% plněním	23
Tabulka 2 - Hodnoty vzorků s 1% plněním	24
Tabulka 3 - Hodnoty vzorků s 2% plněním	25

Seznam symbolů

d	[mm]	geometrický průměr
C	[F]	kapacita
h	[mm]	tloušťka vzorku
R	[Ω]	elektrický odpor
S_{ef}	[m ²]	efektivní plocha elektrody
t	[s]	čas
V_i	[m ³]	objem
$\text{tg } \delta$	[-]	ztrátový činitel
α	[C·m ² ·V ⁻¹]	elektronová polarizovatelnost
ϑ	[°C]	teplota
ϵ_0	[-]	permitivita vakua
$\Delta\epsilon$	[-]	rozdíl permitivity mezi relaxovaným a nerelaxovaným stavem
ϵ_r, ϵ'	[-]	relativní permitivita
ϵ''	[-]	imaginární část komplexní permitivity
ϵ^*	[-]	komplexní permitivita
ϵ_∞	[-]	optická permitivita
ρ_v	[Ωm]	vnitřní rezistivita
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost
v, v_f	[obj. %]	objemová koncentrace částic
v_{crit}	[obj. %]	objemová koncentrace částic v perkolační mezi
σ	[S·m ⁻¹]	vodivost kompozitu
σ_m	[S·m ⁻¹]	vodivost matrice
σ_p	[S·m ⁻¹]	vodivost plniva